

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

2018

ВЫПУСК 2 (1418)
МОСКВА

БЮЛЛЕТЕНЬ
научно-технической
и экономической
информации

ISSN 0135-5910

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Регистрационный номер ПИ № 77-18479

СОДЕРЖАНИЕ

Шевелев Л.Н., Бродов А.А. Энергосбережение, повышение энергоэффективности и снижение выбросов парниковых газов в черной металлургии России

НА ПРЕДПРИЯТИЯХ И В ИНСТИТУТАХ Горнорудное производство

Синицын В.А., Меньшиков П.В., Шеменев В.Г. Эффективность применения смесительно-зарядных машин, предназначенных для транспортирования, изготовления и зарядания взрывчатых веществ

Коксохимическое производство

Полях О.А., Пономарев Н.С., Журавлев А.Д. Сравнительный анализ современных направлений использования промышленных отходов коксохимии

Аглодомненное производство

Фролов Ю.А., Каплун Л.И., Мищенко И.Ф., Асламова Я.Ю. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 11. Технологические методы защиты окружающей среды от вредных выбросов агломерационных фабрик

Тимофеева А.С., Кожухов А.А., Никитченко Т.В., Пивикова М.С. Влияние процесса формирования шихты на прочностные свойства железорудных окатышей

Близнюков А.С., Садррадинов М.Р., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.Ю. Исследование футеровки горна доменной печи (Сообщение 2)

Сталеплавильное производство

Бирюков А.Б., Иванова А.А. Современные подходы к диагностике теплотехнических параметров работы литейно-прокатных агрегатов на участке МНЛЗ – нагревательное устройство

Меркер Э.Э., Крахт Л.Н., Степанов В.А., Еришов Е.В., Королькова Л.Н. Разработка метода распределенного режима дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи с применением железорудного металлизированного сырья

CONTENTS

Shevelev L.N., Brodov A.A. Energy Saving, Increase of Energy Usage Efficiency and Decrease of Emissions of Greenhouse Gases in Steel Industry of Russia

AT ENTERPRISES AND IN INSTITUTES Ore-Mining Industry

Sinitsin V.A., Menshikov P.V., Shemenyev R.V. Efficiency of Mixing-Charging Machines Application, Used for Transporting, Production and Charging of Explosives

Coking and By-products Process

Polyakh O.A., Ponomarev N.S., Zhuravlev A.D. Comparative Analysis of Up-to-date Ways of Industrial Wastes of Coke Production Utilization

Sintering and Blast Furnace Process

Frolov Yu.A., Kaplun E.I., Mischenko I.F., Aslamova Ya.Yu. The Status and Prospects for the Development of the Technology for Manufacturing the Sinter. Part 11. Technological methods of environment protection from hazardous emissions of sintering plants

Timofeeva A.S., Kozhukhov A.A., Nikitchenko T.V., Pivikova M.S. Influence of the Blend Forming Process on Mechanical Properties of Iron Ore Pellets

Bliznyukov A.S., Sadradinov M.P., Makavetskys A.R., Fischenko Yu.Yu. Study of Blast Furnace Hearth Lining (Report 2)

Steelmaking

Biryukov A.B., Ivanova A.A. Up-to-date approaches to Diagnostics of Thermal and Technical Parameters of Casting-Rolling Aggregates Operation at the section Caster – Heating Facility

Merker E.E., Krakht L.N., Stepanov V.A., Ershov E.V., Korol'kova L.N. Development of a Method of Distributed Conditions of Fuel Gas Afterburning in an Arc Steelmaking Furnace with a Charge of DRI

Столяров А.М., Бунеева Е.А., Мошкунев В.В., Потапова М.В. Исследование влияния различных факторов на загрязненность непрерывнолитой заготовки неметаллическими включениями

Рыбенко И.А. Разработка оптимальных технологических режимов процессов получения металлов с использованием методов математического моделирования и инструментальных систем

Прокатное производство

Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Князев С.В. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов

Метизное производство

Шубин И.Г., Шубина М.В. Разработка конструкции канатов с учетом их эксплуатационных характеристик

Металлургическое оборудование и литейное производство

Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В., Спирин Н.А. Исследование эффективности охлаждения вращающегося вала печного вентилятора при использовании устройств однодискового типа

Экономика, управление и организация производства, инвестиции

Бахтурин Ю.А. Планирование сменной производительности карьерного железнодорожного транспорта на основе имитационного моделирования

Модернизация оборудования и реконструкция заводов черной металлургии за рубежом

Новости зарубежной периодики

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

Статистика

52

57

62

69

73

77

85

92

94

105

Stolyarov A.M., Buneeva E.A., Moshkunov V.V., Potapova M.V. Study of the Different Factors Influence on Continuously-casted Bar Impurity by Nonmetallic Inclusions

Rybenko I.A. Development of Optimal Technological Modes of Metal Production Processes Using Mathematic Modelling Methods and Instrumental Systems

Rolling Mill Practice

Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Knyazev S.V. Up-to-Date Technologies of Railway Rails Welding

Wire Products Manufacturing

Shubin I.G., Shubina M.V. Development of a Design of Ropes Taking into Account their Operational Characteristics

Metallurgical Equipment and Foundry Practice

Zajnullin L.A., Kalganov M.V., Kalganov D.V., Spirin N.A. Study of Furnace Fan Rotating Shaft Cooling Efficiency Using Facility of Single Disc Type

Economics, Management, and Organization of Production, Investments

Bakhturin Yu.A. Planning of Shift Productivity of Open-Pit Railway Transport Based on Simulation Modelling

Modernization of Equipment and Reconstruction of the Steel works abroad

News of the Foreign Periodicals

EXPRESS INFORMATION

Statistics

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ

*И. А. РЫБЕНКО, канд. техн. наук, rybenkoi@rambler.ru
(ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»)*

Представлен метод и инструмент разработки оптимальных режимов металлургических процессов, основанный на решении двухконтурной задачи оптимизации. На основе этого метода разработаны оптимальные технологии легирования стали с использованием оксидных материалов и варианты технологий прямого получения металла в агрегате струйно-эмульсионного типа.

Ключевые слова: металлургические процессы; оптимизация; инструментальная система; оптимальный технологический режим; ресурсосбережение.

DEVELOPMENT OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL MODES OF METAL PRODUCTION PROCESSES USING MATHEMATIC MODELLING METHODS AND INSTRUMENTAL SYSTEMS

*I. A. RYBENKO, PhD (Tech), rybenkoi@rambler.ru
(FGBOU VO "Siberian State Industrial University")*

Method and instrument for development of metallurgical processes optimal modes presented, based on a solution of the two-contour optimization problem. Based on the method optimal technology of steel alloying developed by using oxide materials, as well as alternative technologies of direct metal production in a jet-emulsion type facility.

Key words: metallurgical processes, optimization, instrumental system, optimal technological mode, energy saving.

Металлургия является одной из самых ресурсоемких отраслей промышленности. Необходимость снижения энергоемкости и материалоемкости металлургической продукции требует как совершенствования традиционных металлургических схем, так и создания принципиально новых процессов и агрегатов. Решение этих задач связано с исследованиями высокотемпературных процессов в сложных термодинамических системах с физико-химическими превращениями. Поскольку экспериментальные исследования, как правило, являются достаточно доро-

гими, а зачастую и неосуществимыми, то в этих условиях большое значение приобретает вычислительный эксперимент, который позволяет анализировать состояния и процессы и делать выводы о поведении исследуемых объектов на основании модельных представлений. В связи с этим актуальным является создание методик и инструментальных систем моделирования, открывающих возможности для более эффективной разработки новых металлургических технологий и решения оптимизационных задач.

Метод моделирования и оптимизации металлургических процессов

Для решения поставленных задач разработан метод, особенностью которого является системное решение комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач по определению наилучших условий реализации металлургических технологий и путей достижения этих условий [1–4].

Метод включает следующие этапы (рис. 1): формулировку цели и постановку задачи, выделение объекта исследования, определение оптимальных параметров металлургических систем, определение оптимальных режимов металлургических процессов и реализацию промышленных экспериментов.

В результате постановки задачи формируются целевые условия, включающие выбор типа металлургического процесса, вида задачи и задание системы критериев оптимизации.

На этапе выделения объекта осуществляется задание параметров входных-выходных потоков, параметров процесса и выделение стадий и подпроцессов. Результатом реализации этапа являются набор шихтовых материалов, их расходы, химический состав и температура, диапазоны изменения выхода, химического состава фаз и температур продуктов процесса — металла, шлака, газа, параметры процесса, стадий, подпроцессов и совокупность химических реакций, формирующих металлургическую систему.



Рис. 1. Этапы, задачи и результаты метода разработки оптимальных технологических режимов металлургических процессов

На третьем этапе определяются оптимальные параметры металлургической системы — осуществляется выделение областей протекания окислительно-восстановительных процессов, производится оценка конечного равновесного и неравновесного состояния и решается задача оптимизации по определению наилучших условий ее функционирования. Результатом реализации этапа являются границы областей протекания окислительно-восстановительных процессов и оптимальные параметры системы: типы и расходы материалов, температуры, составы газовой фазы и термодинамические показатели.

На четвертом этапе осуществляется разработка металлургической технологии путем нахождения оптимальных режимов и определения путей достижения этих режимов для заданных параметров выходного потока и процесса при оптимизации технико-экономических показателей. Для этого осуществляется разработка и программная реализация математических моделей, проводится исследование металлургического процесса и определяются оптимальные режимы.

На последнем этапе предусматривается проведение промышленных экспериментов для корректировки моделей и отладки технологий.

Таким образом, при реализации метода осуществляется двухконтурная оптимизация путем решения многокритериальных оптимизационных задач двух видов: нахождение параметров системы при определении оптимальных условий протекания процессов и определение оптималь-

ных режимов при реализации металлургических технологий (рис. 2).



Рис. 2. Схема решения задачи оптимизации

В рамках первого контура проведены исследования и определены оптимальные условия восстановления металлов из оксидов в модельных системах [5]. Эти задачи решались на основе полного термодинамического анализа систем с использованием программных продуктов "Терра" и "АвтоАстра". В рамках второго контура

разработаны технологии легирования металла для электросталеплавильного процесса и прямого получения металла в агрегате струйно-эмульсионного типа (СЭР) с использованием

созданной инструментальной системы “Инжиниринг-Металлургия”, представляющей собой комплекс программ, адаптированных для ряда металлургических технологий.

Инструмент реализации метода

Инструментальная система “Инжиниринг-Металлургия” состоит из блоков, позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу шихтовых материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать все стадии и подпроцессы, материальный и тепловой балансы, определять энтальпии входных-выходных потоков, рассчитывать активности компонентов фаз, термодинамические характеристики

химических реакций, технико-экономические показатели процесса, осуществлять многовариантные расчеты, поводить исследования, решать задачу оптимизации по различным критериям и представлять информацию в удобном для пользователя виде. Это позволило решить большой комплекс задач по совершенствованию существующих технологий легирования стали и разработке новых металлургических технологий прямого получения металла в агрегате типа СЭР.

Результаты исследований

Технология прямого легирования стали в печи никелем с использованием никелевого концентрата

На основании решения оптимизационной задачи с использованием инструментальной системы предложена технология прямого легирования стали в электропечи окатышами, состоящими из никелевого концентрата и коксика. Получено оптимальное соотношение никелевого концентрата и коксика в окатышах, обеспечивающее максимальную степень восстановления никеля, которое составляет 0,07 кг коксика на 1 кг никелевого концентрата. Определены оптимальные режимы прямого легирования стали никелевыми окатышами, обеспечивающие коэффициент извлечения никеля 98,5 %. Результаты оптимизации использовались при реализации технологии в лабораторных и промышленных условиях при выплавке стали 08(12)X18H10T в дуговой электропечи ЭСПЦ ОАО ЕВРАЗ ЗСМК.

Технология обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком

Определены оптимальные соотношения и построена номограмма расходов коксика и ферросилиция, необходимых для полного восстановления ванадия из конвертерного ванадиевого шлака при различном содержании пентаоксида ванадия в шлаке [6].

Определены оптимальные условия микролегирования стали ванадием в ковше при различных расходах ванадиевого шлака, восстановителей и различном содержании углерода в стали. Результаты исследований показали, что преобладающим восстановителем является коксик. Оптимальный расход коксика, обеспечивающий максимальную степень восстановления ванадия

для среднеуглеродистой стали, составляет 6 кг/т. При этих условиях варьированием расхода конвертерного ванадиевого шлака можно получать различное содержание ванадия в металле. Результаты расчетов использовались при разработке ресурсосберегающей технологии, реализуемость которой подтверждена лабораторными и промышленными испытаниями в ЭСПЦ ОАО ЕВРАЗ ЗСМК.

Технологии прямого получения металла в агрегате типа СЭР

С использованием методики и инструментальной системы разработаны следующие технологии в агрегате типа СЭР: прямое получение металла из пылевидных руд и железосодержащих отходов, получение марганцевых сплавов, переработка титаномагнетитовых концентратов и прямое восстановление железа с попутным получением синтез-газа. В основу нового непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа (СЭР) положена идея реализации принципов синергетики и неравновесной термодинамики, позволившая создать теоретические основы процесса и универсальную конструкцию агрегата, в котором возможно осуществление различных вариантов технологий [7–10].

Технология прямого получения металла из железосодержащей смеси окалина – шлак – руда

Для заданной производительности опытной установки при расходе смеси 6 кг/с определены оптимальные расходы материалов: расход кокса составляет 6,03 кг/с, кислорода — 5,74 кг/с (4,02 м³/с). Этим параметрам соответствует темпера-

тура 1873 К, степень восстановления железа 96 %, содержание углерода в металле 0,49 % и содержание оксида железа в шлаке 9,47 %. При этом энергоемкость процесса составила 18 ГДж/т металла. Реализуемость технологии подтверждена результатами экспериментов на опытной установке. Например, в одном из экспериментов при расходах металлсодержащей шихты 6 кг/с, отработанного масла 1,2 кг/с, коксика 0,2 кг/с, ферросилиция 0,3 кг/с, алюминия 0,1 кг/с и извести 0,4 кг/с прямым восстановлением был получен металл с содержанием углерода 0,55 %.

Технология переработки мелкофракционных карбонатных и оксидных марганцевых руд

Для предварительного восстановления марганца из высших оксидов или разложения карбонатов и удаления влаги из руды предлагается использовать восстановительный газ, который является продуктом реализации технологии восстановления марганца в агрегате типа СЭР, и таким образом замкнуть процесс, т. е. создать согласованный поток вещества и энергии, проходящий через основной агрегат типа СЭР и подготовительный агрегат кипящего слоя. Основная задача расчета предлагаемой технологии заключалась в определении такого расхода сырой руды в агрегате кипящего слоя, чтобы получить заданный выход полупродукта и одновременно обеспечить возможность полного перевода высших оксидов или карбонатов сырой руды в низшие оксиды восстановительным газом, получаемым в основном агрегате. На примере оксидной руды Селезеньского и карбонатной руды Усинского месторождений путем решения задачи оптимизации определены расходы материалов и производительность агрегата, которые позволили замкнуть технологический цикл. Результаты исследования и оптимизации процессов переработки марганцевых руд Селезеньского месторождения использовались при отладке технологий получения марганцевых сплавов в ООО УК «Сибирская горно-металлургическая компания».

Технология переработки титаномагнетитового концентрата

Технология обеспечивает одновременно с выплавкой природно-легированного металла также получение товарного титанистого шлака с содержанием 45–50 % TiO_2 и более.

С целью выяснения принципиальной возможности реализации процесса были проведены исследования и определены оптимальные показа-

тели процесса для секундного расхода шихты, кислорода и углеродсодержащих материалов, в целом представляющих собой газовзвесь с объемным газосодержанием 99 % и секундным расходом металлической части шихты 4 кг. Состав металлошихты, включающей титаномагнетитовый концентрат, окалину и шлак конвертерного производства, следующий: 26,8 % FeO , 46,1 % Fe_2O_3 и 17,5 % TiO_2 . Результаты моделирования показали, что оптимальным является секунднй расход коксика 1,4–1,5 кг/с, обеспечивающий максимальное восстановление железа при отсутствии карбидов титана в металле. Содержание оксида титана в шлаке составляет 43 % (при содержании CaO 30 % и Al_2O_3 15 %). Путем решения задачи оптимизации проведена оценка технологически допустимых расходов углеродсодержащих материалов и зависимости масс металла и шлака от возможного содержания оксидов железа в шлаке при различном содержании CO в газовой фазе.

Результаты исследования технологии, полученные с использованием инструментальной системы, легли в основу при выборе состава шихтовых материалов и энергоносителей при реализации процесса на опытной установке.

Технология прямого восстановления металла с одновременным получением синтез-газа

Основная задача при разработке технологии заключалась в создании условий для более гибкого управления составом отходящих газов с малой зависимостью от технологии получения металла за счет разделения потоков металла, шлака и газа, а также в обеспечении коррекции состава газа до параметров кондиционного синтез-газа путем совмещения пароугольного газификатора с металлургическим агрегатом, что дало возможность создания бездымного энергометаллургического процесса, так как отходящий газ превращается в товарный продукт.

Для данной технологии была решена задача оптимизации по коррекции состава попутного технологического газа. Определены расходы угля и кислорода, необходимые для получения металла с содержанием углерода 0,50 % и температурой 1873 К при расходе железной руды 1 кг/с, которые составили 0,674 и 0,382 кг/с соответственно. Выход газа составил 1,06 кг/с. Этот газ в виде газошлаковой эмульсии поступает в шлакоприемник, куда навстречу шлаковому потоку через фурму вдувается пар. За счет тепла шлака пар нагревается со 150 до 700 °С и через решетку вместе с технологическим газом, отсепарированным от шлака и имеющим температуру 1773 К, непрерывно поступает в слой угля в камере коррекции газа, которая осуществлялась

за счет кислородной конверсии метана кислородом, подаваемым в камеру через фурмы. В результате решения задачи оптимизации определены расходы угля, пара, природного газа и кислорода, обеспечивающие соотношение $\text{CO}:\text{H}_2$

равное 2:3. В результате реализации процесса получается удвоенное количество синтез-газа и его калорийность возрастает с 6432 до 20832 кДж/кг.

Выводы

Таким образом, разработан и инструментально реализован в системе “Инжиниринг-Металлургия” метод моделирования и оптимизации металлургических процессов, особенностью которого является системное решение комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач по определению наилучших условий реализации металлургических технологий и путей достижения этих условий. С использованием метода и инструментальной системы решен ряд задач по оп-

ределению оптимальных условий осуществления технологий легирования стали никелем и ванадием с использованием оксидных материалов и технологий получения металла в агрегате типа СЭР: прямого получения металла из железорудных материалов, переработки марганцевых руд и титаномагнетитовых концентратов и прямого получения металла с попутным синтез-газом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбенко, И. А. Моделирование и оптимизация стационарных режимов металлургических процессов [Текст]: монография / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов. — Новокузнецк: СибГИУ, 2015. — 168 с.
2. Рыбенко, И. А. Применение методики и инструментальной системы расчета металлургических процессов для разработки теоретических основ ресурсосберегающих технологий [Текст]: монография / И. А. Рыбенко. — Новокузнецк: СибГИУ, 2016. — 187 с.
3. Рыбенко, И. А. Применение инструментальной системы моделирования и оптимизации для разработки теоретических основ технологий легирования и модифицирования стали [Текст] / И. А. Рыбенко // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. — 2017. — № 2. — С. 37–43.
4. Рыбенко, И. А. Оптимизация технологий в струйно-эмульсионном металлургическом агрегате с использованием методики и инструментальной системы моделирования [Текст] / И. А. Рыбенко // Там же. — 2017. — № 3. — С. 60–65.
5. Рыбенко, И. А. Термодинамическое моделирование процессов в элементарных системах [Текст]: монография / И. А. Рыбенко. — Новокузнецк: СибГИУ, 2016. — 98 с.
6. Рыбенко, И. А. Исследование условий процесса восстановления ванадия и железа из конвертерного ванадиевого шлака [Текст] / И. А. Рыбенко [и др.] // Изв. вузов: Черная металлургия. — 2011. — № 4. — С. 3–5.
7. Цымбал, В. П. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса [Текст] / В. П. Цымбал, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко [и др.] // Там же. — 2015. — Т. 58. — № 8. — С. 572–577.
8. Tsymbal, V. P. A new jet-emulsion metallurgical process [Text] / V. P. Tsymbal // Steel in Translation. — 2015. — V. 45. — Is. 8. — P. 550–554.
9. Цымбал, В. П. Предпосылки и принципы создания самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора [Текст] / В. П. Цымбал, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко [и др.] // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: тр. IV Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. В 2 ч. Ч. I.; под общ. ред. В. П. Цымбалы, Т. В. Киселевой. — Новокузнецк: СибГИУ, 2016. — С. 27–36.
10. Цымбал, В. П. Нетрадиционный подход к переработке титаномагнетитовых и железомарганцевых руд [Текст] / В. П. Цымбал, И. А. Рыбенко, В. В. Павлов // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. — 2015. — № 10. — С. 90–94.